

Holzkränbrücke

*Dr.-Ing. Eric Penno,
Dr.-Ing. Sven Eichhorn,
Dipl.-Ing. Tobias Schöneck,
Prof. Dr.-Ing. Markus Golder*

*Technische Universität Chemnitz
Fakultät Maschinenbau
Institut für Fördertechnik und Kunststoffe
Professur Förder- und Materialflusstechnik*

Derzeit werden Krane nahezu ausschließlich in metallischer Bauweise gefertigt, wobei Stahl den maßgeblichen Konstruktionswerkstoff darstellt. Bei geringen Belastungen, beispielsweise in Kleinkransystemen, finden auch Aluminiumlegierungen Verwendung. Der im Hinblick auf Nachhaltigkeit vorteilhaftere Werkstoff Holz spielt im heutigen Kranbau hingegen kaum noch eine Rolle. Vor diesem Hintergrund stellt sich die Frage, welche Leistungsanforderungen moderne Holzwerkstoffe für einen Einsatz im Kranbau erfüllen müssen, wie eine geeignete konstruktive Umsetzung gestaltet werden kann und welche kritischen Aspekte dabei zu berücksichtigen sind. Ziel ist es, die Potenziale und Grenzen des Einsatzes von Holzwerkstoffen im Kranbau aufzuzeigen. Erste Erkenntnisse und Umsetzungen deuten darauf hin, dass Holzwerkstoffe in ausgewählten Anwendungsbereichen von Kranen technisch sinnvoll eingesetzt werden können. Dadurch eröffnet sich ein neues Forschungsfeld, das auf die Schaffung wissenschaftlicher Grundlagen für eine sichere, wirtschaftliche, ökologische und technisch geeignete Ausgestaltung von Krananlagen und deren Komponenten in Holzbauweise abzielt.

[Schlüsselwörter: Krananlage, Portalkran, Brückenkrän, Holz, erneuerbare Werkstoffe]

1 MOTIVATION

Historische Quellen belegen den Einsatz von Krananlagen, deren tragende und konstruktive Hauptkomponenten überwiegend aus Holz bzw. Holzwerkstoffen sowie Naturfaserseilen bestanden. In der Römerzeit und später im Mittelalter wurden massive Bauten häufig unter Verwendung von Krankonstruktionen bewerkstelligt. Nach historischen

Dokumentationen kam der römische Polyspastos zum Einsatz, eine Weiterentwicklung des Kranichs, des altgriechischen Krans. Der Kran war mit einem Rollenflaschenzugsystem ausgestattet. Der Pentaspatos, ein Kran mit einem Fünffrollenflaschenzugsystem, wies in Kombination mit einem Tretrad eine Höhe von 10 m bis 12 m auf. Es konnten einzelne Lasten bis 6 t gehoben werden. [1, 2, 3] Die damals verwendeten Holzmaterialien unterschieden sich sowohl in ihrer geometrischen Auslegung als auch hinsichtlich ihrer mechanischen Eigenschaften deutlich von den heute verfügbaren, technologisch weiterentwickelten Holzwerkstoffen. In der Moderne etablierten sich zunehmend Stahl und Aluminium als bevorzugte Konstruktionswerkstoffe im Bau- und Maschinenwesen. Dadurch verlor Holz u. a. im Kranbau zunehmend an Bedeutung und wurde schrittweise verdrängt [4]. Aktuell rücken Holzwerkstoffe aufgrund ihrer verbesserten mechanischen Eigenschaften, fortschrittlicher Fertigungstechnologien und ihrer ökologischen Vorteile wieder verstärkt in den Fokus von Wissenschaft und Industrie. In diesem Zusammenhang gewinnt auch das Forschungsgebiet „Holz im Kranbau“ zunehmend an Bedeutung. Erste dokumentierte Einsatzmöglichkeiten moderner Holzwerkstoffe im Maschinen- und Logistikbereich zeigen sich insbesondere in der Skidfördertechnik [5] sowie bei Lastaufnahmemitteln [6, 7].

2 DERZEITIGER FORSCHUNGSSTAND

Ausgehend von den Kernbereichen der Grundlagenforschung, Material- und Systementwicklung sowie Erprobung und Evaluierung besteht das mittelfristige Ziel darin, konzipierte Krandemonstratoren zu realisieren und als Brücke zwischen wissenschaftlichen Erkenntnissen und industrieller Anwendung zu nutzen. Material- und Strukturversuche wurden bereits umfangreich durchgeführt, und erste Demonstratoren mit Spannweiten von bis zu 5 m wurden getestet. Bei einer als rechteckiges Hohlprofil ausgeführten Kranbrücke mit einer Spannweite von 4 m konnten Bruch-

lasten von bis zu 30 kN bei gleichzeitig geringer Eigenmasse von 75 kg erzielt werden, was das Leichtbaupotenzial bestätigt. Aufbauend auf den Erkenntnissen wird derzeit ein Zweiträgerbrückenkrane mit einer Spannweite von 10 m und einer Traglast von 2 Tonnen umgesetzt. Dieser translational ausgerichtete Ansatz eröffnet erhebliche Potenziale für technologische Innovationen sowie für den Wissens- und Technologietransfer. Abbildung 1 zeigt exemplarisch ein entsprechendes Grobkonzept aus der Anfangsphase des Vorhabens für die Anwendung als Portalkran im Werkstattumfeld. Die wissenschaftliche und technische Bedeutung des Vorhabens besteht in der Entwicklung und Etablierung eines neuartigen, ausgeprägt praxisorientierten Forschungsfeldes. Hieraus resultiert eine Vielzahl grundlegender und anwendungsbezogener Fragestellungen, die systematisch untersucht werden müssen. Krane sind hochkomplexe technische Systeme und übernehmen zugleich eine zentrale Funktion als Schnittstellen innerhalb zahlreicher industrieller Prozessketten. Vor diesem Hintergrund besteht ein wesentlicher Forschungs- und Entwicklungsbedarf hinsichtlich bislang nicht verfügbarer, marktfähiger technischer Lösungen und geeigneter Konstruktionsprinzipien für den Kranbau.

Die geplanten Forschungsarbeiten eröffnen Herstellern und Anwendern im Kranbau die Möglichkeit, natürliche und ökologisch optimierte Faserverbundwerkstoffe in Form moderner, geeigneter Holzwerkstoffe einzusetzen. Dadurch kann sich die Branche als innovationsorientierter und zukunftsfähiger Industriezweig positionieren. Die ökonomische Bedeutung des Vorhabens wird durch das prognostizierte Marktvolumen des globalen Kranmarktes unterstrichen, welches aktuell rund 26,3 Mrd. USD beträgt und bis 2032 auf etwa 46,7 Mrd. USD anwachsen soll, was einer durchschnittlichen jährlichen Wachstumsrate von 6,9 % entspricht [9]. Der Kranbau als Teilsektor des Maschinen- und Anlagenbaus stellt somit einen bedeutenden Wachstumsmarkt dar.

Die gesellschaftliche Relevanz dieses Forschungsansatzes ergibt sich insbesondere aus den ökologischen Vorteilen von Holz- und Holzverbundkonstruktionen. Als nachwachsende Rohstoffe leisten diese Werkstoffe einen wesentlichen Beitrag zur Kohlenstoffbindung und stellen damit einen wichtigen Baustein für die Dekarbonisierung sowie für die nachhaltige Transformation von Wirtschaft und Gesellschaft dar. Die technische Integration von Holzwerkstoffen erhöht die sogenannte Holzbauquote und erweitert den Anwendungsbereich dieses Werkstoffs über das klassische Bauwesen hinaus auf den Maschinen- und Anlagenbau [10].

3 SUBSTITUTIONSMÖGLICHKEIT

Das zentrale Ziel des Forschungsvorhabens liegt in der systematischen Untersuchung des Substitutionspotenzials metallischer Bauweisen durch Holzwerkstoffe im Kranbau. Im Mittelpunkt steht dabei die Bewertung des Dreiklangs aus technischen Vorteilen einschließlich der Sicherheit sowie ökonomischen und ökologischen Vorteilen im Vergleich zu konventionellen metallischen Konstruktionen. Eine besondere Bedeutung kommt der konstruktiven Ausgestaltung einzelner Komponenten zu, da diese maßgeblich die strukturelle Integrität und Funktionsfähigkeit der Gesamtsysteme bestimmen. Im Rahmen der wissenschaftlichen Bearbeitung werden relevante Fragestellungen identifiziert, strukturiert und mittels eines methodisch fundierten Ansatzes untersucht. Die Forschungsaktivitäten sind dabei konsequent praxisorientiert ausgerichtet, um einen direkten Transfer der gewonnenen Erkenntnisse in industrielle Anwendungen zu ermöglichen.

In einer ersten Phase erfolgte die Analyse der Substituierbarkeit unterschiedlicher Kranbauarten, wobei der Fokus auf Portalkranen, Leichtkransystemen und insbesondere Brückenkranen liegt. Brückenkrananlagen stellen die am weitesten verbreitete Bauform dar und werden zur Handhabung von Stückgütern in Werkstätten, Produktionshallen und Lagerbereichen sowohl im Innen- als auch im Außenbereich eingesetzt. Die grundlegende Struktur umfasst Kranträger mit Kranfahrwerk, auf denen die Krankatze auf einem oder zwei Trägern verfährt, die auf Kopfträgern aufliegen oder fest mit diesen verbunden sind (vgl. Abbildung 2). Der Arbeitsbereich unterhalb des Krans ist konstruktionsbedingt rechteckig ausgebildet und aufgrund der Anfahrmäße der Katze in der Regel kleiner als die Fläche der gesamten Kranbahn. Ein wesentlicher Vorteil von Brückenkranen ist die vollständige Bodenfreiheit des Arbeitsraums. Dem stehen nach dem Stand der Technik vergleichsweise hohe Eigen- bzw. Totlasten gegenüber. Kranbrücken mit Spannweiten bis etwa 12 m werden überwiegend als Walzprofile in I-Profil-Bauweise ausgeführt, während bei größeren Spannweiten Stegblech- oder Kastenträger zum Einsatz kommen, wobei Letztere die höchste Verwindungssteifigkeit aufweisen [12].

Hinsichtlich des Werkstoffeinsatzes zeigt sich, dass Vollholz- und Furnierwerkstoffe grundsätzlich für den Einsatz im Kranbau geeignet sind. Kriterien wie chemische Beständigkeit, Umweltverträglichkeit einschließlich des CO₂-Bindungspotenzials, Werkstoffkosten und Verfügbarkeit führen zu einer insgesamt positiven Bewertung von Holzwerkstoffen im Vergleich zu metallischen Konstruktionswerkstoffen. Das Substitutionspotenzial verschiedener Kranbauweisen ist zur Übersicht in Abbildung 3 dargestellt, wobei die Substituierbarkeit von links nach rechts abnimmt.

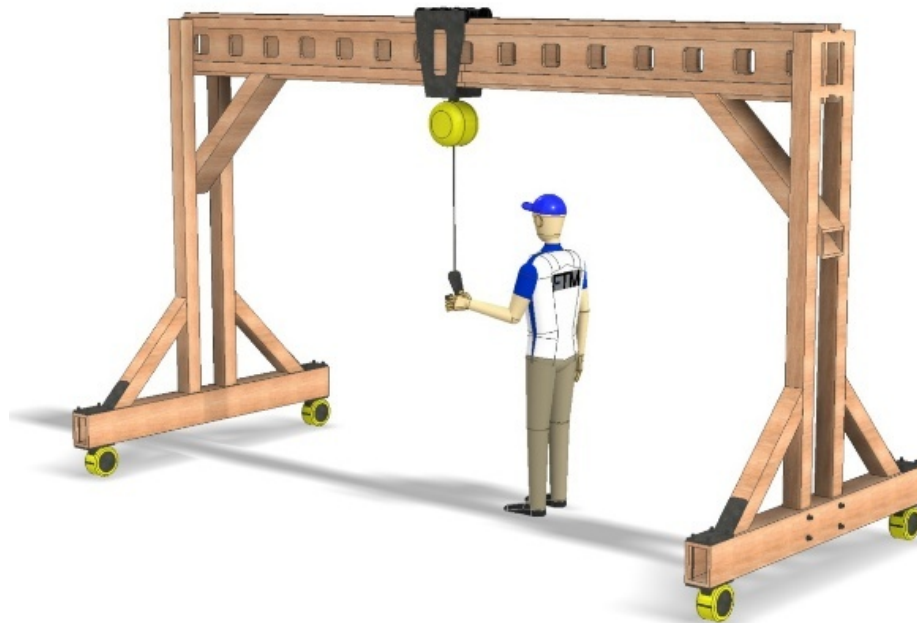


Abbildung 1: Grobkonzept eines Portalkrans unter Verwendung von Holzwerkstoffen [8]

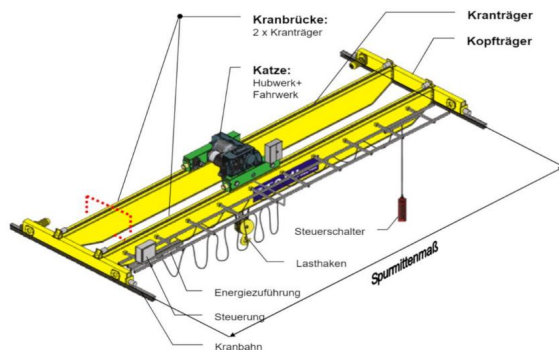


Abbildung 2: Aufbau eines Zweiträgerbrückenkrans [11]

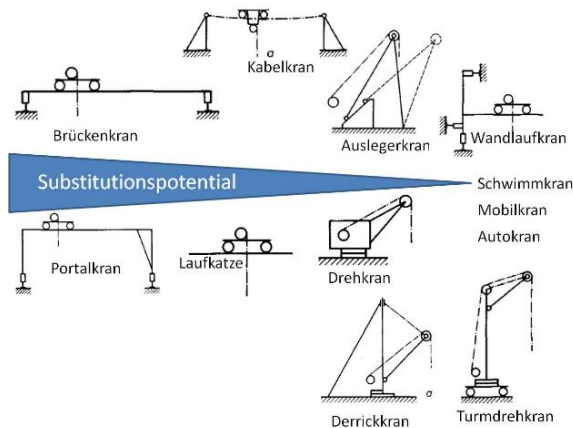


Abbildung 3: Substitutionspotenzial von Kranbauweisen (unter Verwendung von DIN 15001, 1973) [13]

4 NORMUNG

Im Holzbau mit besonderem Fokus auf Tragwerke und Brücken sind zahlreiche Normen maßgeblich. Eine zentrale Grundlage bildet die EN 1990:2002 (Eurocode – Grundlagen der Tragwerksplanung), welche allgemeine Prinzipien für die Planung von Tragwerken definiert. Ergänzend regelt die DIN EN 1991-1 die maßgebenden Einwirkungen. Dazu zählen das Eigengewicht, die Nutzlasten sowie Temperatur- und Brandeinwirkungen. Für den baulichen Brandschutz ist zudem die DIN 18234 relevant.

Die Bemessung und Konstruktion von Holztragwerken, insbesondere von Brücken, wird in der EN 1995-2 (Eurocode 5) geregelt. Diese Norm formuliert Anforderun-

gen an Sicherheit, Gebrauchstauglichkeit und Dauerhaftigkeit und basiert auf Grenzzustandskonzepten mit Teilsicherheitsbeiwerten. Sie umfasst unter anderem Spannungs- und Ermüdungsnachweise sowie Begrenzungen der Durchbiegung ($L/400 - L/500$). Die Dauerhaftigkeit von Holztragwerken wird durch konstruktive Maßnahmen wie ausreichende Belüftung sowie gegebenenfalls ergänzende Vorkehrungen, etwa geneigte Flächen, Kapillarverschlüsse oder Abdeckungen, sichergestellt.

Für den Kranbau werden die Einwirkungen mit Einführung des Eurocode 3 einschließlich der zugehörigen nationalen Anhänge umfassend erfasst. Trotz des vergleichsweise hohen rechnerischen Aufwands ermöglicht dieser Ansatz eine leichtere und wirtschaftlichere Auslegung von Kransystemen. Die normative Grundlage für Entwurf, Berechnung und Bemessung von Kranen bildet die DIN EN 13001 in ihren Teilen 1 bis 3. Da Kranbahnträger eine Schnittstelle zwischen Krankonstruktion und Bauwerk darstellen, basieren die Einwirkungen aus dem Kranbetrieb gemäß DIN EN 1991-3 auf der DIN EN 13001-2. Ergänzend stehen mit der DIN EN 1993-6 spezifische Regeln für Entwurf, Berechnung und Bemessung von Kranbahnträgern und deren Unterstützungen zur Verfügung. Neben den europäischen Maschinenrichtlinien sind für den Kranbau insbesondere die DIN EN 13001 für die statische und dynamische Auslegung sowie die Regelwerke des Eurocode 3 für Stabilitäts- und Beulsicherheitsnachweise von Bedeutung.

Im Rahmen der Untersuchungen wurde analysiert, welche Berechnungs- und Auslegungsgrundlagen aus dem Holz- und Kranbau übertragbar sind. Dabei zeigte sich, dass für Krane, insbesondere für Brückenkrane in Holzbauweise, Spannungs-, Stabilitäts- und Betriebsfestigkeitsnachweise erforderlich sind. Diese berücksichtigen statische und dynamische Biegebeanspruchungen, dynamische Hub- und Fahrvorgänge sowie Ermüdung über die Lebensdauer.

An der Schnittstelle werden die Anforderungen des Holzbaus mit denen des Maschinen- und Kranbaus kombiniert. Während im Metallbau Schweißnähte als kritische Bereiche gelten, stehen bei Holzwerkstoffen Klebe- und Steckverbindungen sowie deren Tragfähigkeit im Fokus. Bei Zweiträger-Brückenkranen sind zusätzlich Torsionsbeanspruchungen, Steghöhen und Euler'sche Knickfälle zu analysieren.

Die umfangreiche Normung ermöglicht die Definition von Lasten und bietet Hilfestellungen für die Auslegung. In der Anwendung zeigen sich jedoch auch Grenzen.

5 HOLZKRANBRÜCKE

5.1 HERAUSFORDERUNGEN BEI DER NACHWEISFÜHRUNG

Für den Anwendungsfall einer Kranbrücke sind Nachweise hinsichtlich Tragfähigkeit, Gebrauchstauglichkeit, insbesondere der Durchbiegung, sowie Ermüdung gemäß Eurocode 3 und DIN EN 1993-6 zu erbringen. Grundsätzlich lässt sich damit auch für Konstruktionen aus Holzwerkstoffen eine normative Nachweisführung ableiten. Einschränkung ist jedoch zu berücksichtigen, dass der Eurocode 3 und die zugehörigen Regelwerke primär auf metallische Bauweisen, insbesondere Stahlkonstruktionen, aus-

gerichtet sind. Die darin verankerten Nachweiskonzepte basieren überwiegend auf spannungsbezogenen Grenzzustandsbetrachtungen metallischer Werkstoffe. Ein wesentliches Bemessungskriterium stellt dabei die Einhaltung der zulässigen Durchbiegung unter Prüflast dar. Während sich für metallische Werkstoffe auf Grundlage der maßgebenden Sicherheitsbeiwerte unmittelbar zulässige Werkstoffspannungen bestimmen lassen, weisen Holzwerkstoffe wie WVC (Wood Veneer Composite, Holzfurnierlagenverbundwerkstoffe) im Vergleich zu Stahl S235JR einen um etwa den Faktor 10 bis 30 geringeren Elastizitätsmodul und damit deutlich reduzierte Steifigkeitseigenschaften auf. Zur Einhaltung der normativ vorgegebenen Durchbiegungsgrenzen sind bei Kranvarianten aus Holzwerkstoffen daher vergleichsweise große Bauteilquerschnitte erforderlich, die mit einem erhöhten Materialeinsatz einhergehen. Gleichzeitig liegen die resultierenden Spannungen deutlich unterhalb der maximal aufnehmbaren Werte, sodass die Bauteile aus festigkeitsbezogener Sicht erheblich überdimensioniert sind. Ein möglicher Gewichtsvorteil von Holzwerkstoffen kann infolgedessen bei einer ausschließlich an den Anforderungen metallischer Bauweisen orientierten Auslegung weitgehend aufgehoben werden. Insgesamt zeigen die Untersuchungen, dass an der Schnittstelle zwischen Holzbau- und Kranbaunormen eine gezielte Anpassung der Nachweisführung erforderlich ist. Die bestehenden Regelwerke bieten hierfür grundsätzlich eine konsistente Grundlage, um den sicheren und dauerhaften Einsatz von Holzwerkstoffen im Kranbau zu ermöglichen und das Innovationspotenzial nachhaltiger Tragwerkslösungen zu erschließen.

Auch die Abnahme von Krananlagen aus Holzwerkstoffen gestaltet sich derzeit schwierig, da die bestehenden Regelwerke überwiegend auf metallische Werkstoffe ausgerichtet sind. Eine Auslegung auf Grundlage dieser Regelwerke oder in Kombination mit Normen des klassischen statischen Holzbaus kann zu überdimensionierten Trägerquerschnitten führen und zugleich Unsicherheiten hinsichtlich der normativen Einordnung als Maschine hervorrufen. Insbesondere bei Erstabnahmen ergeben sich daraus erhöhte Anforderungen und zusätzliche Herausforderungen.

5.2 WERKSTOFF

Holzwerkstoffe basieren auf nachwachsenden Rohstoffen und sind überregional als standardisierte Formatwerkstoffe verfügbar. Der für die Umsetzung der Versuchskörper und Demonstratoren verwendete Furnierwerkstoff in Form von WVC (Wood Veneer Composite) bietet eine gute Grundlage und ist je nach konkreter Ausführung in Längen von etwa 2,5 m bis 7 m und Breiten bis 2,5 m erhältlich. Durch variierende Lagenaufbauten, Verdichtungsverfahren oder Harzzugaben lassen sich Elastizitätsmodule bis etwa 22.000 N/mm² bei Dichten von rund 1,4 g/cm³, z. B. in Form von Kunstharzpressholz, realisieren [14]. Grenzen ergeben sich aus der anisotropen Struktur von

Holz. Das bedeutet, dass u. a. mechanische Eigenschaften stark richtungsabhängig sind. Feuchtebedingtes Quellen und Schwinden ist bei Konstruktionen mit Holzwerkstoffen deutlich stärker zu berücksichtigen als thermische Längenänderungen bei metallischen Werkstoffen [15].

Ein wesentlicher Vorteil und eine Anwendungsmöglichkeit von Holzwerkstoffen liegen in ihren guten dämpfenden Eigenschaften. Im Vergleich zu metallischen Konstruktionen reagieren sie auf schwingungsanregende Einwirkungen, etwa bei Stößen während des Hebens oder beim Fahren, mit einem erheblich stärkeren Dämpfungsverhalten. Dadurch lässt sich das dynamische Betriebsverhalten voraussichtlich positiv beeinflussen.

Eine Einschränkung bestand in der Verfügbarkeit von Werkstoffen mit den benötigten Eigenschaften. Werkstoffe mit geringen Streuungen der Materialeigenschaften waren nur in Längen von 2,5 m lieferbar. Es wurden Konzepte erarbeitet und umgesetzt, um trotz der im Verhältnis zur Gesamtstruktur begrenzten Rohplattenlänge lange Kranbrücken zu realisieren.

5.3 HERSTELLUNG UND TRANSPORT

Die Fertigung der für mögliche Krananwendungen erforderlichen Bauteile kann auf handelsüblichen großformatigen CNC-Holzbearbeitungszentren erfolgen. In Verbindung mit der guten Verfügbarkeit geeigneter Holzwerkstoffe sowie der flächendeckenden Infrastruktur holzverarbeitender Betriebe ergeben sich insbesondere Vorteile hinsichtlich Fertigungskosten, Lieferzeiten und Transportaufwand. Durch den Einsatz gesteckter Krantraversen können modulare Kranbrücken aus einzelnen Segmenten mit beispielsweise 1,2 m bis 2,5 m Länge realisiert werden. Diese lassen sich vergleichsweise kostengünstig über Speditionen transportieren. Bei kleineren Spannweiten von bis zu etwa 5 m besteht zudem die Möglichkeit, die Einzelkomponenten in Abmessungen auszuführen, die einen Transport auf Grundlage gängiger Palettenmaße ermöglichen.

5.4 GESTECKTE VARIANTE

Eine gesteckte Variante (vgl. Abbildung 4) ermöglicht einen einfachen Transport (vgl. Abbildung 5) und eine einfache Montage direkt am Einsatzort. Verbleibt die Verbindung lösbar, so ist ein unkomplizierter Rückbau nach temporärer Nutzung ebenfalls möglich. Grenzen ergeben sich jedoch hinsichtlich der Durchbiegung bzw. Belastbarkeit. Durch die vielen Verbindungs- und Stoßstellen ist ein Grenzwert für die Durchbiegung schnell ausgereizt, obwohl die Struktur und die Materialeigenschaften ein deutlich größeres Potenzial für die Tragfähigkeit aufweisen.

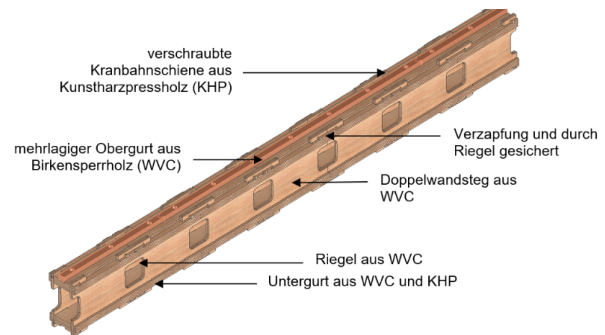


Abbildung 4: Modell einer gesteckten Variante



Abbildung 5: Packgröße von 2 Kranbrücken mit je 4 m Spannweite

5.5 GEKLEBTE VARIANTE UND EINSATZBEDINGUNGEN

Verklebte Kranbrücken sind ebenfalls realisierbar, jedoch im montierten Zustand transportintensiver. Sie eignen sich insbesondere für langfristige Einsatzszenarien, wobei die Verklebung mit Einschränkungen auch vor Ort erfolgen kann. Kranbrücken aus Holzwerkstoffen sind bevorzugt in trockenen Umgebungen einzusetzen. Ein Einsatz im Außenbereich ist möglich, erfordert jedoch geeignete Schutzmaßnahmen wie Beschichtungen oder Überdachungen. Die Grenze des Einsatzes bildet der biologische Werkstoff selbst, der unbehandelt anfällig gegenüber Feuchtigkeit sowie Pilz- und Insektenbefall ist. Aufgrund der begrenzten lieferbaren Plattengrößen bei den benötigten Materialeigenschaften wurden die erforderlichen Bauteillängen durch Längsverbindungen mit Schwalbenschwanzverbindungen und Klebeflächen realisiert. Abbildung 7 zeigt eine Variante der überlappenden Verklebung. Somit sind belastbare Trägerlängen z. B. von 5 m (vgl. Abbildung 8) oder länger möglich.

Aufbauend auf dem Grobkonzept eines Portalkrans wurde ein Werkstattkran mit einer in Holzbauweise aus-



Abbildung 6: Montierter Zustand beider Kranbrücken

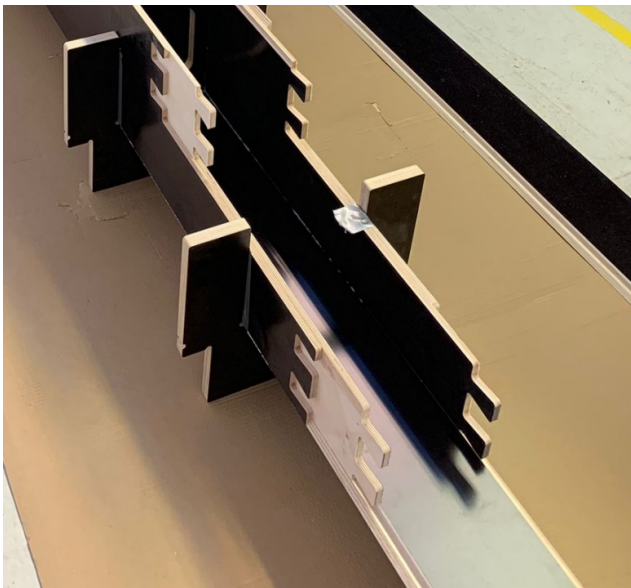


Abbildung 7: Längsverbindung über verleimten Schwalbenschwanz

geführten Katze und manuellem Hebezeug umgesetzt (vgl. Abbildung 9). Der Werkstattportalkran weist ein Gesamtgewicht von 125 kg und eine Tragkraft von 0,5 t auf; die Hakenhöhe beträgt 2,3 m und die Fahrbreite 3 m.

5.6 TESTS

Im Zuge der Forschung wurden neben Materialuntersuchungen und ganzheitlichen Strukturversuchen auch die angewendeten Verbindungen untersucht. So wurden die lösbaren Verbindungsstellen, wie die Verzapfung der Kranbrücke und die speziellen Verschraubungen über Halbschalen, geprüft (vgl. Abbildung 10). Des Weiteren wurden die Längsverbindungen, z. B. in der Ausführung als geklebter Schwalbenschwanz, untersucht (vgl. Abbildung 11). Der Schwalbenschwanz dient in erster Linie dem passgenauen Montieren und Positionieren der Klebefläche und wird in den aktuellen Umsetzungen herangezogen. Derzeit laufen Versuche zur Einordnung einer möglichen Klassifizierung



Abbildung 8: Umsetzung einer 5-m-Kranbrücke als Hohlprofil

der Bauweisen anhand der ertragbaren Lastzyklen und der daraus resultierenden strukturellen Auswirkungen.

5.7 ÄHNLICHKEITSTHEORIE

Die Ähnlichkeitstheorie stellt ein etabliertes Konzept dar, das in zahlreichen ingenieurwissenschaftlichen Disziplinen zur Analyse, Entwicklung und Optimierung technischer Systeme Anwendung findet. Ihr wesentliches Potenzial liegt in der Reduktion des Entwicklungsaufwandes, indem entweder verkleinerte Vergleichsmodelle genutzt oder geeignete Größenstufungen zur Ableitung ganzer Baureihen bestimmt werden.

Zwei Systeme gelten als physikalisch ähnlich, wenn sie durch identische Differentialgleichungen unter gleichen Anfangs- und Randbedingungen beschrieben werden können. Zur Beschreibung dieser Ähnlichkeit werden in der Fachliteratur dimensionslose Kennzahlen herangezogen, die eine Vergleichbarkeit von Systemen unterschiedlicher Maßstäbe ermöglichen. Klassische Beispiele in der Konstruktionswissenschaft sind die Hooke- und Froude-Zahl. Für den Konstruktionsprozess ist daher eine präzise Analyse der maßgebenden physikalischen Einflussgrößen erforderlich, da eine rein geometrische Skalierung in der Regel nicht ausreicht. Technische Systeme können erst dann als ähnlich betrachtet werden, wenn mindestens eine relevante dimensionslose Kennzahl sowohl im Grundentwurf als auch in den Folgeentwürfen konstant bleibt.

In der Konstruktionswissenschaft wird zwischen Grundähnlichkeiten und speziellen Ähnlichkeiten unter-



Abbildung 9: Umsetzung eines Werkstattkrans mit manuellem Hebezeug

schieden. Grundähnlichkeiten beschreiben elementare dimensionslose Kennzahlen, häufig auch als Stufensprünge bezeichnet, wie den geometrischen Stufensprung φ_L , den zeitlichen Stufensprung φ_t oder den kraftbezogenen Stufensprung φ_F . Durch deren Kombination lassen sich spezielle Ähnlichkeiten ableiten. So beschreibt die Verknüpfung von φ_L und φ_F eine statische Ähnlichkeit, charakterisiert durch die Hooke-Zahl. Werden zusätzlich zeitliche Stufensprünge berücksichtigt, ergeben sich kinematische oder dynamische Ähnlichkeiten, etwa in Form der Froude- oder Cauchy-Zahl.

Im Rahmen der Entwicklung modularer Kranbrücken aus WVC wird die Möglichkeit der Anwendbarkeit der Ähnlichkeitstheorie auf relevante Kranprofile untersucht. Besonderes Augenmerk liegt dabei auf den werkseitig definierten g estuften H olzwerkstoffplattendicken s owie auf den anisotropen Materialeigenschaften. Ziel ist es, aus marktüblichen Plattenstärken skalierbare Faktoren und Stufensprünge für unterschiedliche Querschnittsausführungen eines Brückenkrans abzuleiten.

Die Untersuchungen zeigen, dass sich beim Ansatz einer konstanten Werkstoffausnutzung die Trägheitskräfte und elastischen Kräfte quadratisch mit dem geometrischen Stufensprung entwickeln, während Gewichtskräfte kubisch zunehmen. Die Grenze liegt jedoch bei der spannungskonstanten Skalierung, wenn die unterschiedlichen Kraftarten in einer Anwendung einen maßgeblichen Einfluss auf das Spannungsniveau haben. Bei Brückenkränen wirken elastische Kräfte (z. B. Hublast) und Gewichtskräfte durch die Eigenlasten. Eine spannungskonstante Skalierung ist unter Berücksichtigung der Eigenlasten, wie sie bei Brückenkränen maßgeblich sind, nicht exakt möglich. In der Praxis resultieren daraus Abweichungen in der Werkstoffausnutzung und im Verformungsverhalten, so dass hier lediglich eine Einstufung als halbähnliche Baureihe möglich ist. Alternativ zum beschriebenen Ansatz können Trägheits- und elastische Kräfte ebenfalls kubisch skaliert werden, wodurch ein Spannungsstufensprung $\varphi_\sigma = \varphi_L$ entsteht. Daraus lassen sich jedoch keine allgemeingültigen Aussagen zu statischen oder dynamischen Spannungszuständen ableiten.

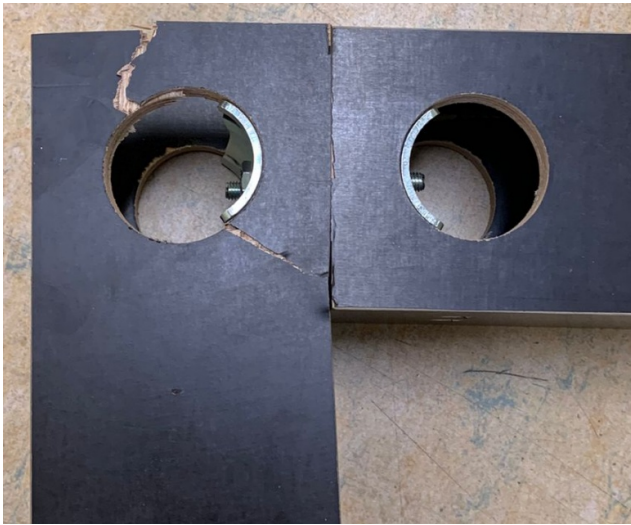


Abbildung 10: Test der lösbaren Verbindung

Zusammenfassend stellt die Ähnlichkeitstheorie ein wirkungsvolles Instrument für die Entwicklung modularer Kranträger aus WVC dar. Sie ermöglicht eine systematische Skalierung und Bewertung unterschiedlicher Baugrößen und trägt wesentlich zur Effizienzsteigerung in der Konstruktion sowie zur Ableitung material- und ressourceneffizienter Baureihen bei.

6 ZUSAMMENFASSUNG

Bisher konnte gezeigt werden, dass Holzwerkstoffe wie WVC aufgrund ihres geringen spezifischen Gewichts ein hohes Potenzial für Leichtbauanwendungen aufweisen und daher insbesondere für den Kranbau interessant sind, beispielsweise zur Reduzierung bewegter Massen. Durch ihren anisotropen Werkstoffaufbau können charakteristische Eigenschaften wie eine hohe Zugfestigkeit und Steifigkeit in Faserrichtung gezielt ausgenutzt werden. Auf Grundlage einer geeigneten Werkstoffauswahl erfolgt die analytische und numerische Auslegung verschiedener Kranbrückenkonzepte unter Berücksichtigung von Spannungs-, Ermüdungs-, Betriebsfestigkeits- und Stabilitätsnachweisen.

Die Anwendung der Ähnlichkeitstheorie zeigt, dass eine geometrische Ähnlichkeit grundsätzlich hergestellt werden kann. Aufgrund des Einflusses der Eigengewichtskraft auf das Spannungsniveau in Kombination mit elastisch wirkenden Kräften, beispielsweise der Hublast, liegt jedoch lediglich eine halbähnliche Baureihe vor. Eine spannungskonstante Skalierung unter Einbeziehung des Eigengewichts ist nicht möglich, wodurch die Anwendbarkeit der Ähnlichkeitstheorie entsprechend eingeschränkt wird.

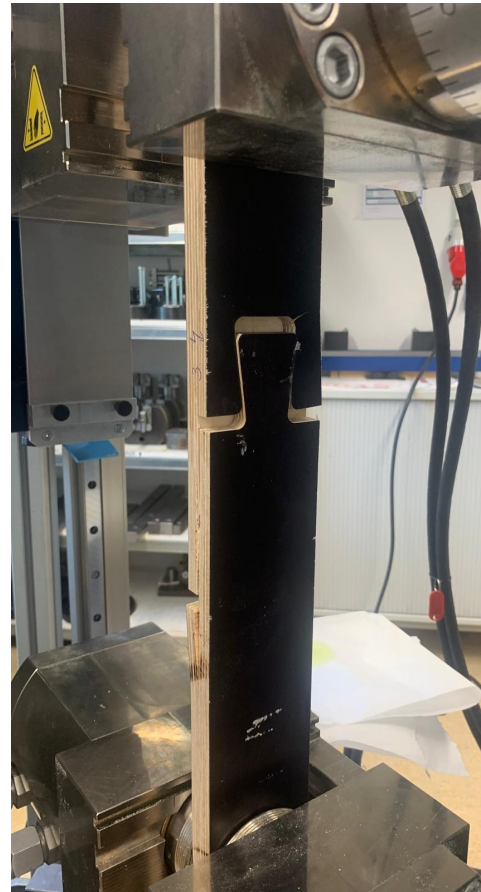


Abbildung 11: Zugversuche der Schwalbenschwanz-Klebeverbindungen

Zur Validierung der entwickelten Ansätze wurden Demonstratoren in unterschiedlichen Baugrößen umgesetzt. Dazu gehören ein Modellkranträger mit einer Spannweite von 2 m, ein leichter Portalkran für flexibel nutzbare Montageplätze mit Spannweiten von bis zu 4 m und einer Tragfähigkeit von 0,5 t sowie eine schienengebundene Kranbrücke mit einer Spannweite von 10 m. Darüber hinaus werden strukturelle Gemeinsamkeiten bei der Berechnung unterschiedlicher Kranbauweisen untersucht, um deren Übertragbarkeit auf verschiedene Anwendungsfälle zu bewerten. Auf diese Weise werden Grundlagen für maßstäbliche Untersuchungen von Krananlagen geschaffen und zugleich die Anwendbarkeit der Ähnlichkeitstheorie auf Holzwerkstoffe im Kranbau überprüft.

Anschließend erfolgt eine technische Evaluierung anhand statischer und dynamischer Untersuchungen. Ergänzend werden die entwickelten Lösungen hinsichtlich technischer, ökonomischer und ökologischer Kriterien mit dem aktuellen Stand der Technik verglichen. Ziel ist es, zu bewerten, ob Holzwerkstoffe im Kranbau grundsätzlich

eine technisch und wirtschaftlich vorteilhafte Alternative zu etablierten Konstruktionswerkstoffen darstellen können.

Ergebnisse und grundlegende Erkenntnisse bestätigen, dass der Einsatz von Holzwerkstoffen im modernen Kranbau grundsätzlich realisierbar ist. Besonders bei der Verwendung von WVC (Wood Veneer Composite, Holzfurnierlagenverbundwerkstoffe) zeigt sich ein deutliches Leichtbaupotenzial gegenüber konventionellen Stahlbauweisen. Detaillierte Analysen hierzu sind in der Machbarkeitsstudie der Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe (FNR, Projektnummer 2220HV060X) dokumentiert [16]. Aufbauend auf den dort identifizierten Forschungsfragen werden diese im Rahmen eines aktuellen Projekts vertiefend untersucht. Diese Arbeit wird durch das Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL) aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages über die Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e. V. (FNR) als Projektträger gefördert (Förderkennzeichen: 2221HV103X).

LITERATUR

- [1] "Der werdegang des krans," <https://www.haischkran.de/themenseiten/anfrage-krananlage>, 2026, zugriff: 25.01.2026.
- [2] T. Abel, "Die kräne der römer," <https://thomas-abel.jimdofree.com>, 2026, zugriff: 25.01.2026.
- [3] I. Tudor, "Roman empire," <https://de.scribd.com/document/470595036/crane-history11>, 2026, zugriff: 25.01.2026.
- [4] E. Werner, *Fragen und Antworten zu Werkstoffen*, 8th ed. Berlin-Heidelberg: Springer Vieweg, 2016.
- [5] "Informationsdienst holz: Produktionsanlagen aus holz in der autofabrik," <https://informationsdienst-holz.de/artikel/produktionsanlagen-aus-holz-in-der-autofabrik>, 2014, 05.11.2014.
- [6] D. Poll, "Kostenreduzierung in der intralogistik: Leichter und nachhaltiger: Holz als trumpf im maschinenbau," <https://www.produktion.de/technik/leichter-und-nachhaltiger-holz-als-trumpf-im-maschinenbau/1691206>, 2024, zugriff: 16.03.2024.
- [7] P. Kluge, "Statisch-dynamische bauteilanalyse durch laststeigerungsversuche am beispiel von lastaufnahmemitteln in holzbauweise – teil 1 und 2," *Holztechnologie*, 2019, ISSN 0018-3881.
- [8] "FNR-projektbeitrag: Sichere, leichte, ökologische kransysteme aus holzwerkstoffen!" <https://www.fnr.de/projektfoerderung/ausgewaehlte-projekte/projekte/sichere-leichte-oekologische-kransysteme-aus-holzwerkstoffen-sloeksyholz>, 2025, zugriff: 02.04.2025.
- [9] Global Market Insights, "Kranmarktanalyse," <https://www.gminsights.com/industry-analysis/crane-market>, 2024, zugriff: 16.03.2024.
- [10] A. Purkus, J. Lüdtke, G. Becher, D. Jochem, H. Polley, S. Rüter, H. Weimar, and C. Maack, "Charta für holz 2.0: Kennzahlenbericht 2019 forst & holz," Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e. V. (FNR), Gülzow-Prützen, Tech. Rep., 2019.
- [11] M. Golder, "Ein beitrag zur kostenabschätzung für brückenkranträger in kastenbauweise auf basis ihrer bemessungsgrundlagen und dimensionierungsnachweise," Ph.D. dissertation, Universität Karlsruhe, 2004.
- [12] P. Römisch, *Materialflusstechnik*. Wiesbaden: Vieweg+Teubner Verlag, Springer Fachmedien, 2011.
- [13] "DIN 15001-1:1973-11: Krane; begriffe, einteilung nach der bauart," DIN Deutsches Institut für Normung, 1973.
- [14] "Deutsche holzveredelung: Übersicht für materialeigenschaften," <https://www.dehonit.de/dehonit-kunstharzpressholz/fuer-mechanische-beanspruchungen/>, 2026, zugriff: 22.01.2026.
- [15] A. Wagenführ and F. Scholz, *Taschenbuch der Holztechnik*, 2nd ed. Leipzig: Carl Hanser Verlag, 2012.
- [16] E. Penno, "Krananlagen in holzbauweise," Technische Universität Chemnitz, 2023, uRN: urn:nbn:de:bsz:ch1-qucosa2-861715.

Dr.-Ing. Eric Penno, Wissenschaftlicher Mitarbeiter an der Professur Förder- und Materialflusstechnik der TU Chemnitz

Dr.-Ing. Sven Eichhorn, Forschungsgruppenleiter Anwendungstechnik Erneuerbarer Werkstoffe an der Professur Förder- und Materialflusstechnik der TU Chemnitz

Dipl.-Ing. Tobias Schöneck, Forschungsgruppenleiter Sichere Mechatronische Systeme an der Professur Förder- und Materialflusstechnik der TU Chemnitz

Prof. Dr.-Ing. Markus Golder, Leiter der Professur Förder- und Materialflusstechnik der TU Chemnitz

Adresse: Professur Förder- und Materialflusstechnik, Technische Universität Chemnitz, Reichenhainer Str. 70, 09126 Chemnitz, Deutschland,

Telefon: +49 371 531-31558

E-Mail: eric.penno@mb.tu-chemnitz.de